

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ЭРИТРОЦИТОВ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

М. М. Кугейко, Д. А. Смунов

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: kugeiko@bsu.by

Основной функцией эритроцитов является перенос кислорода от лёгких по всему организму и углекислого газа обратно в лёгкие [1]. Из этого следует, что для популяции эритроцитов очень важным параметром является средняя площадь поверхности, определить которую для нативных эритроцитов весьма трудоёмко. Модель двояковогнутого диска наилучшим образом описывает геометрию эритроцита, что подтверждается экспериментально [2]. Здесь же предложена 4-х параметрическая модель эритроцита человека

$$\rho^4 + 2S\rho^2z^2 + z^4 + P\rho^2 + Qz^2 + R = 0, \quad (1)$$

где ρ – радиус в цилиндрической системе координат ($\rho^2 = x^2 + y^2$). Параметры P , Q , R , и S связаны с геометрическими параметрами эритроцита.

Программный комплекс для расчёта оптических характеристик, разработанный в работе [3], обладает следующими достоинствами: модель эритроцита (1) уже встроена в исходный код программы, также имеется возможность учитывать особенности формы частицы для ускорения расчёта. Результатом численного моделирования является набор сечений и факторов экстинкции, рассеяния, поглощения $C/Q_{ext/sca/abc}$ и матрицы Мюллера S для каждого из углов заданного, которые могут быть использованы в матричном уравнении $I_{sca} = ASI_{in}$, которое можно записать в более подробном виде следующим образом:

$$\begin{pmatrix} I_{sca} \\ Q_{sca} \\ U_{sca} \\ V_{sca} \end{pmatrix} = \frac{\exp(-2\operatorname{Im}(k_{sca})r)}{|k_{sca}|^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Так, зная вектор Стокса I_{sca} рассеянного излучения для отдельной частицы, рассчитывается вектор Стокса для популяции $I_{sca} = \sum I_{sca}$, с помощью которого можно рассчитать интенсивность и поляризационные характеристики рассеянного излучения. Также можно рассчитать нормиро-

ванную индикатрису рассеяния $\sigma(\Theta) = 4\pi \frac{\sum I_{sca}(\Theta)}{\sum C_{sca}}$. Расчёты производились для случая неполяризованного падающего излучения, то есть $I_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

В основе регрессионного подхода к решению обратных задач лежит предположение, что искомые микрофизические параметры (МФП) $\mathbf{X} = (x_i)$ могут быть найдены с помощью некоторого аналитического преобразования ОХ $\mathbf{Y} = (y_j)$, где y_j – измеряемые оптические характеристики [4]. Ниже приводятся результаты расчета с использованием метода линейных регрессий:

$$\ln(x_i) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \ln(y_j), \quad (3)$$

где численные значения коэффициентов a_j определяются на основе используемой выборки методом наименьших квадратов:

$$\min \left(\sum_{k=1}^N \left[\ln(x_i) - a_{i0} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \ln(y_j) \right] \right), \quad (4)$$

Минимальное количество слагаемых n в (3) определяется точностью аппроксимации, а максимальное дополнительными привносимыми ошибками и степенью взаимной корреляции результатов. Для выбора оптимальных измеряемых оптических параметров y_j в (4) применялся метод минимизации погрешности:

$$\min \delta x_i(\Theta_1 \dots \Theta_n) = \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{x_{ik}} \left| x_{ik} - \exp(a_{i0}(\Theta_1 \dots \Theta_n) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\Theta_1 \dots \Theta_n) \ln(y_j)) \right| \right] \quad (5)$$

где N – размер выборки, δx_i – относительная погрешность измерения S , $y_j = y(\Theta_j)$ – измеряемая под углом Θ_j оптическая характеристика, $a_{ij}(\Theta_1 \dots \Theta_n)$ – коэффициенты в (4).

В данной работе применялось, оптимальное согласно (5), следующее регрессионное уравнение:

$$\ln S = a_0 + a_1 \ln \sigma(\Theta_1) + a_2 \ln \sigma(\Theta_2) + a_3 \ln P(\Theta_3) + a_4 \ln P(\Theta_4), \quad (6)$$

где S – средняя площадь эритроцита в популяции, $\sigma(\Theta)$ – индикатриса рассеяния, $P(\Theta)$ – коэффициент линейной поляризации, Θ_{1-4} – углы, указанные в таблице 1, a_{0-4} – коэффициенты в формуле (4), указанные в таблице 2.

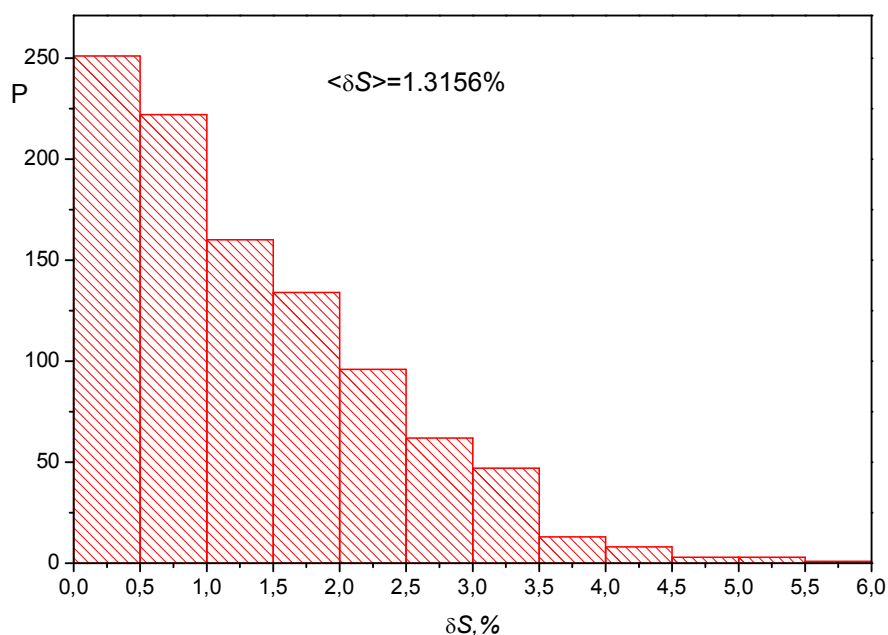
Таблица 1

Угол	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4
Значение °	6	17	81	119

Таблица 2

Коэффициент	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Значение	4.3895	0.1638	0.3458	-0.2353	-0.2047

На рис. 1 приведена гистограмма погрешности определения S с использованием (6), где по оси ОУ отложена частота повторяемости P ошибок $\delta S = \frac{|S - S^*|}{S}$ (число реализаций P МФП эритроцитов, для которых получены данные погрешности δS), S и S^* – соответственно заданные и рассчитанные с использованием (6).

Рис. 1. Гистограмма погрешности определения S с использованием (6)

1. Lewis S. M. et al. Dacie & Lewis Practical Haematology. Churchill Livingstone, 2001. 595 с.
2. Юркин М. А. Моделирование светорассеяния клетками крови с помощью метода дискретных диполей. Новосибирск, 2008. 231 с.
3. Smirnev D. A., Chaumet P. C., Yurkin M. A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2015. Vol. 156, № 0. P. 67–79.
4. Кугейко М. М., Лысенко С. А. // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 104, № 4. С. 654–659.